

トランジスタ特性とトランジスタチョッパの動作について

中 川 孝 之

On the Characteristics of the Transistor, and the Mechanisms of the Operation of Transistor Chopper.

Takayuki NAKAGAWA

On the basis of Ebers-Moll equations of the transistor, I have studied the methods for the indication of the characteristics of the transistor, with aid of the X-Y recorder.

I have concluded that the characteristics are analogous to the experiments, and that it is useful to explain the mechanisms of the operation of both transistor and its chopper, as to the input signals.

・ はしがき

トランジスタ特性をあらわすのにエミッタ接地、ベース接地の特性が良く用いられていることは周知の通りである。

筆者はこれらの特性からトランジスタチョッパの微小電流に対する動作を明らかにすることは容易でないことを知ったので、微小電流の増幅作用に注目した特性の表示法を、Ebers-Moll の理論式との関係において考察を加え、さらに XY 記録計の使用によって容易にトランジスタの特性を画けることを示し、さらにまた、この新しい特性曲線を用いてチョッパ回路の動作状況の予想ができることを明らかにしたい。

2. Ebers-Moll のトランジスタ理論式と特性表示法

よく知られているように、Ebers-Moll のトランジスタ理論式⁽¹⁾は次のように示されている

$$\begin{aligned} I_e &= -\frac{I_{eo}}{1-\alpha_n\alpha_i} \left(e^{\frac{qE_{eb}}{kT}} - 1 \right) + \frac{\alpha_i I_{co}}{1-\alpha_n\alpha_i} \left(e^{\frac{qE_{cb}}{kT}} - 1 \right) \\ I_c &= \frac{\alpha_n I_{eo}}{1-\alpha_n\alpha_i} \left(e^{\frac{qE_{eb}}{kT}} - 1 \right) - \frac{I_{co}}{1-\alpha_n\alpha_i} \left(e^{\frac{qE_{cb}}{kT}} - 1 \right) \dots\dots\dots(1) \\ I_e + I_b + I_c &= 0 \end{aligned}$$

この場合の各電圧は、ベース接地としてコレクタ、エミッタ電圧をそれぞれ E_{cb} , E_{eb} であらわしている。

いま、チョッパ動作や、エミッタ接地型増幅の動作を考えるための新しい特性表示には、(1)式に或る変換をしなければならない。すなわち

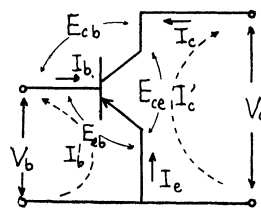
$$\begin{aligned} I_b &= -I_b', \quad I_c = -I_c' \\ I_e &= I_b' + I_c' \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

および

$$\begin{aligned} E_{be} &= -E_{eb} \equiv -V_b, \\ E_{ce} &= E_{eb} - E_{cb} = -V_c = V_b - E_{cb} \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

これ等の関係は、図—1 に示す電圧、電流の表示法から容易にわかる。

図—1



いま、(1), (2)そして(3)の関係から I_b , I_c , E_{cb} , そして E_{eb} を消去して、 I_c' , I_b' , V_c そして V_b の関係式に変換すると次のようになる。

$$\begin{aligned} e^{\frac{-qV_b}{kT}} - 1 &= -\frac{1}{I_{eo}} \{ I_b' + (1-\alpha_i) I_c' \} \\ e^{\frac{-qV_c}{kT}} - 1 &= \frac{(I_{co} - \alpha_n I_{eo}) I_b' + \{ (1-\alpha_i) I_{co} + (1-\alpha_n) I_{eo} \} I_c'}{I_{co} \{ I_{eo} - I_b' - (1-\alpha_i) I_c' \}} \dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

さらに、この式を変形する。

$$\begin{aligned} I_c' &= -\frac{1}{1-\alpha_i} I_b' - \frac{I_{eo}}{1-\alpha_i} \left(e^{\frac{-qV_b}{kT}} - 1 \right) \\ \{ I_{co}(1-\alpha_i) (e^{\frac{-qV_c}{kT}} - 1) + (1-\alpha_n) I_{eo} + (1-\alpha_i) I_{co} \} I_c' &\dots\dots\dots(5) \\ &= -\left(I_{co} e^{\frac{-qV_c}{kT}} - \alpha_n I_{eo} \right) I_b' + I_{co} I_{eo} \left(e^{\frac{-qV_c}{kT}} - 1 \right) \end{aligned}$$

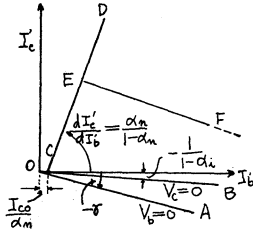
さて、(4), (5)式の特徴を知るために、 V_c , V_b が零となったとすれば、 $e^{\frac{-qV_c}{kT}} = 1$, $e^{\frac{-qV_b}{kT}} = 1$ となるので、(4), (5)式は次のようになる。

$$I_b' + (1-\alpha_i) I_c' = 0$$

$$I_b + \frac{(1-\alpha_n)I_{eo} + (1-\alpha_i)I_{co}}{I_{co} - \alpha_n I_{eo}} I_c \doteq 0 \dots \dots \dots (6)$$

これ等の関係は、縦、横軸に I_c , I_b をえらぶと図-2 となる。

図-2



すなわち、 $V_b=0$ および $V_c=0$ なる場合、OA, および OB なる原点を通る直線であらわれ、それぞれの方向係数は、 $\alpha_n < 1$, $\alpha_i < 1$, そして $I_{co} > I_{eo}$ なるため負の傾斜をもつ。一方⁽²⁾ V_c, V_b が大となれば、

$e^{-\frac{qV_c}{kT}} = 0, e^{-\frac{qV_b}{kT}} = 0$ となるので、(4)および(5)式は次のようになる。

$$I_c + \frac{1}{1-\alpha_i} I_b = \frac{I_{eo}}{1-\alpha_i} \dots \dots \dots (7)$$

$$(1-\alpha_n) I_c = \alpha_n I_b - I_{co}$$

したがって、 V_b, V_c が大になれば直線 EF, CD に漸近する傾向をもっていることになる。なを、(6), (7)式より $\frac{dI_c}{dI_b}$ を求めると、 V_b, V_c が零に近いとき次のようになる。

$$\frac{dI_c}{dI_b} = -\frac{1}{1-\alpha_i} \quad (V_c \doteq 0)$$

$$\frac{dI_c}{dI_b} = -\frac{I_{co} - \alpha_n I_{eo}}{(1-\alpha_n)I_{eo} + (1-\alpha_i)I_{co}} \equiv -r, \quad (V_b \doteq 0)$$

また、 V_b, V_c が比較的高いと、次の関係が導かれる。

$$\frac{dI_c}{dI_b} = -\frac{1}{1-\alpha_i}, \quad \frac{dI_c}{dI_b} = \frac{\alpha_n}{1-\alpha_n} \equiv \beta$$

すなわち、 V_c が大である場合に $\frac{dI_c}{dI_b}$ は、よく知られ

ている電流増幅率を示していることになる。また、あとでくわしく述べるつもりであるが、トランジスタチョップの動作は図-2の4つの直線、OA, OB, CD そして EF などの傾斜が重要な役割を果たすわけで、これ等の性質は $\alpha_i, \alpha_n, I_{eo}$, そして I_{co} に影響される。

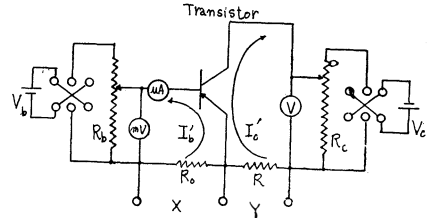
3. 特性測定法

2. で述べた事柄を実証することと、トランジスタチョップの動作機構の解析を行うに都合良くなるように、トランジスタ特性を XY 記録計に直記させるようにする測定回路は、図-3のようにする。

すなわち、 I_b, I_c の電流を計算できるように、 R_b, R を既知の低抵抗とし、 $E_{be}=V_b, E_{ce}=V_c$ を変化できるように、乾電池と可変抵抗器を組合せ、図に示す

ように結んだ。まづ、 $V_b=0$ とした状態で V_c を色々の値にとり、 V_b の電圧を変化したとき、XY 記録計の指示曲線は V_c をパラメータとした曲線群となる。

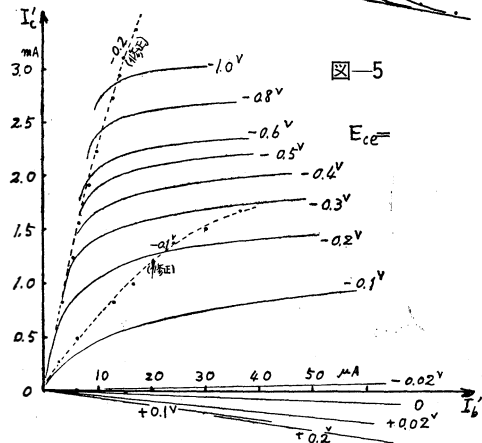
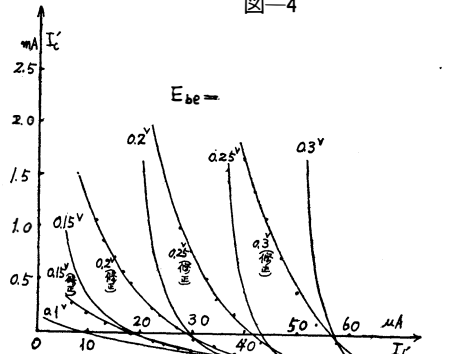
図-3



次に、 $V_c=0$ とした状態で V_b を色々の値にとり、 V_c の電圧を変化したとき、XY 記録計の指示曲線は V_b をパラメータとした曲線群であらわれる。

ここで特筆すべきことは、 I_c, I_b は互に影響し合っているので、一操作中、可変抵抗を側の電圧計の指針は初めと終りとでは変る。この変化は I_b, I_c が大きいほどいちじるしい。このようなわけで、2.に述べたような特性を得るためには、図に示す両方の可変抵抗を共に変化しながら記録計を働かせ、条件に合った状態で打点し、実験終了後これらの点を結んだ曲線を描けばよい。前にのべた特性はこの意味で不正確で

図-4



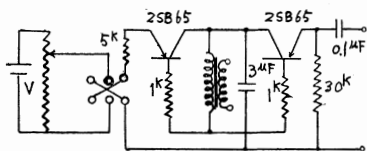
はあるが、動作の特徴を考えるには充分役立つと考え

られる。そこで実験結果の一例を示すと図—4、図—5のようになる。とくに打点法によって画いた曲線は、2.にのべた内容を定性的によく満足しているように思われる。

4. トランジスタチョッパ回路の実験とその結果

トランジスタチョッパは、微小直流電圧、電流の交流変換によく用いられているが、きわめて微小な電圧の直交変換には色々問題があると言うことは周知の通りである。筆者は3.にのべた特性から、このような現象の生ずる理由を明らかにし、トランジスタチョッパ改良のための資料を得たいと考える。

そこで、市販のトランジスタを用いて、良く知られているチョッパ回路⁽³⁾を図—6のように作り、直流正、負の入力電圧と、交流出力電圧の関係を励振電圧を変化させて、その動作機構をしらべた。



図—6

その結果、励振電圧が比較的大であるときは、正、負何れの直流電圧を入力端子にあたえても、直流電圧にはほぼ比例する振幅の交流矩形波出力電圧が得られるが、もし励振電圧が小さいときは、負の直流入力電圧があたえられると、その電圧が小さい間は矩形波交流電圧が得られるが、電圧が大きくなると交流半波整流のような波形に変化し、さらに電圧が大となれば半波整流波で振幅がほぼ一定である波形と、微小な直流電圧と重畳したような電圧として出力電圧が得られる。反対に直流正電圧が加えられるときはこの様な事は生じない。そこでこの有様は写真に示す通りである。なお、直流電圧が正、負に印加されると、出力電圧波は位相を 180° 異にしていることも写真から明らかである。この実験では励振電圧に60サイクルの交流電源を用い、図に示した電気容量は波形を整えるために用い

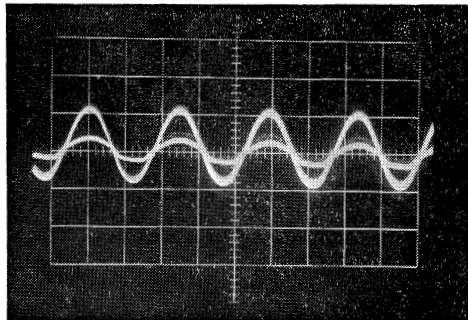


写真 1

ているほか後でのべる役割をしている。

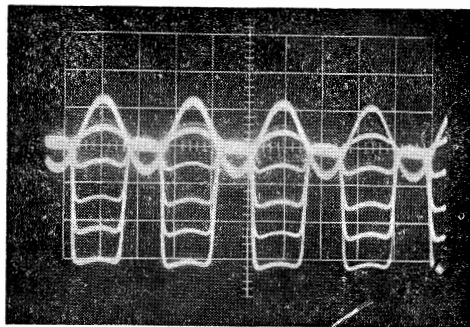


写真 2

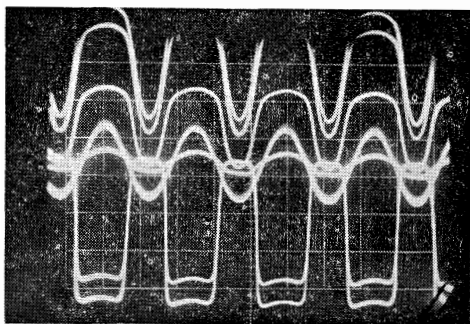


写真 3

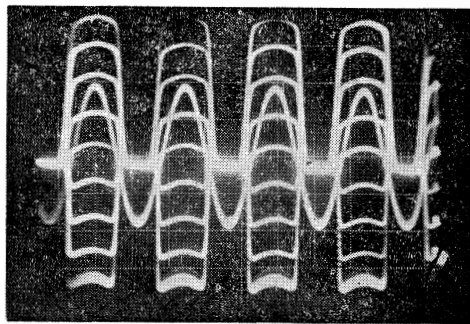


写真 4

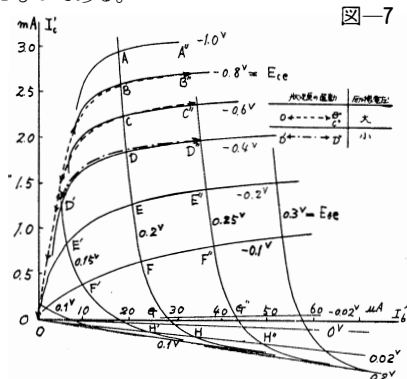
次に得られた写真とその図形の説明をする。写真1は励振電圧が小さく0.4Vをあたえ、直流入力電圧0Vの場合の出力波形、および励振電圧の波形であって、両者の位相関係を知るため撮影したものである。写真2は励振電圧0.4Vとし、入力直流電圧を正に加え、この電圧を0V、50mV、100mV、150mV、そして200mVにした場合、二重露出法によって得られた出力波形である。写真3は励振電圧を同様0.4Vとし入力に負の電圧をあてた場合の波形に注意して撮影しているが、正電圧が入力に加わった場合との位相関係をも観測したものである。おわりに写真4は励振電圧を前の三つの場合より大きく、1Vとし、入力直流電圧50mVづつ異なる電圧を加えた場合で、前と同様二重露出法によるものである。

これ等の写真から励振電圧が小さい場合や、エミッタに負電圧があたえられた場合、そしてエミッタに零電圧があたえられた場合には特にその波形に注意せねばならないであろう。

5. トランジスタチョップの動作機構

動作の概略は次のように思われる。図—6 において、エミッタ端子に直流の正、負電圧を加えた場合の写真からチョップ動作は励振電圧は Base が負電位のときだけ出力に出力波形が生じ、正電圧のときはほぼ 0 に近いことがわかる。またコンテナは励振電圧の正側を接地した事と同じく考えられる。いま励振電圧が充分大きいときは、入力電圧の正負によってスイッチのように、On, off 動作をし、抵抗 R の端子に電圧が生じ、これが出力交流波形となる。次に励振電圧がかなり小さい場合には、後でべる理由で負の電圧が加ると A, B トランジスタの働きは一変する。即ち B は前と同じ動作をすると考えられるが、A はコレクタ接地のような結合になるため、エミッタ、ベース電圧は励振交流電圧と直流電圧と重畳した新しい $E_{be} = E - E_0 \sin \omega t$ が作用することになる。この場合 E は負の直流電圧、 $E_0 \sin \omega t$ は励振電圧である。前に述べたように、励振電圧が小さいとき、または入力電圧が大きいときは、トランジスタ A の動作は異なる。この場合トランジスタ特性からわかるように $I_b \sim I_c$ curve の飽和性がいじめるしいため、写真 3 のような出力波形が得られる。これ等の事柄をトランジスタ特性と関連させて考えると次のようである。

トランジスタの特性図—4, 5 は 3 でのべたように XY 記録計を用いて 1 枚の図面上に容易に画くことが出来る。図—7 はその様にして作った記録をトレースしたものである。



さてこの図を用いてチョップの動作を考えよう。いま直流入力为正および負にエミッタ端子に加えられると、動作の状況点は図—7 の $I_c \sim I_b$ 平面上のある曲線上を繰返し運動をすることが想像される。さらに精細に考えると、入力電圧のいろいろの値に対して、そして励振電圧の大きさによって $OE'FF''$, $OE'EE''$,

OAA'' なる曲線に沿う繰返し運動を状況点とする。入力正電圧が加る場合はトランジスタ A, B に E_{be} が正, E_{cb} が交流として作用するので、A, B 共にスイッチ On, off の動作を励振電圧の加り方によって行うので、抵抗端子に交流出力電圧があらわれる。このような場合は或る意味でその働きは 1 個のトランジスタを用いたチョップと同等と見做すことが出来る。然るに負の直流電圧がエミッタに加えられると、トランジスタ B は前述の B と同じ動作をするが、トランジスタ A の動作は異なる。このときはエミッタに負の電圧が加わっているの、見方を変えて考えると、前述のトランジスタ B に $E_{be} = E - E_0 \sin \omega t$ なる電圧が作用しているのと同等と考えれば、トランジスタ特性曲線を用いてその動作を考えることができる。

いま励振電圧が大きい事は E_{be} を 0 に近づけ得る事を意味し、入力直流電圧が大きいときは状況点は $A''B''C'' \dots F''$ 曲線によって或る制限を受ける。そこで励振電圧が大きければ $E_{be} \approx 0$ となる事があるので、容易に状況点は $OE'FF''$, $OE'EE''$ として OAA'' 曲線上をたどらせる事が出来るが、励振電圧が小さければ例えば $DE'FH''$ 曲線を境とし、左側へ状況点を移動させることが出来なくなる。この場合はトランジスタの働きが電流を遮断する瞬間が存在しなくなり、出力電圧が写真 3 の様にあらわれることになると思われる。

この様な理由から入力電圧の正負に応じた電圧の交流変換には、出来る限り励振電圧を大にしておく事が望しいわけである。

6. むすび

以上トランジスタの Ebers—Moll の理論式に基礎をおく特性表示法は、実験的にも理論と定性的に良い一致が見られるばかりでなく、トランジスタチョップの動作機構を考えるにも都合が良いことを明らかにした。さらにまた回路に特別な蓄電器を挿入することにより、良く知られたトランジスタインバータに置きかえて考える事もわかった。この場合の蓄電器は励振電源の周波数が高ければ高い程小さな容量で充分であることは明らかである。終りに今まで取扱って来た電圧は極めて小さい電圧とは言いがたい。比較的大信号については以上述べたような考えで説明できるが、極めて微小な電圧に対する範囲では、理論式通りに、測定器は精度上のこともあり、動作していない。この領域内でのチョップの動作に関しては更に研究を進めたいと考えてであることを附言する。

参考文献

- (1) Ebers Moll Proc. of I.R.E. 1954 1761
- (2) 著者 富山大学工学部紀要 9 巻 昭和33年3月
昭和39年電気4学会北陸支部講演会前刷
- (3) 川上正光 電子回路 V